

## 画像からのあいまい情報を用いたロボット制御

廣田, 薫 / Hirota, Kaoru / 荒井, 良徳 / 池津, 達哉 /  
Ikezu, Tatsuya / Arai, Yoshinori

---

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学工学部研究集報 / 法政大学工学部研究集報

(巻 / Volume)

21

(開始ページ / Start Page)

55

(終了ページ / End Page)

76

(発行年 / Year)

1985-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004065>

# 画像からのあいまい情報を用いたロボット制御

廣田 薫\*\*・荒井良徳\*・池津達哉\*\*

## Robot Control Based on Imagery Information With Ambiguity

Kaoru HIROTA\*\*, Yoshinori ARAI\*, Tatsuya IKEZU\*\*

### Abstract

Human-like control method of an industrial arm-robot with five joints is presented. The main idea is based on the concept of probabilistic sets in extended fuzzy expression. Ambiguous instructions in terms of membership and vagueness are generated by the robot itself using imagery data from ITV cameras. These instructions are divided into several classes based on the imagery information about the object such as the size and the shape, and the positional relationships between the hand of the robot and the object which consist of two factors (direction and distance). The robot automatically moves his hand toward the object according to the instructions and finally catches the object. Basic concept and full algorithms are presented with a lot of figures, and several experimental results are also demonstrated.

KEY WORDS Image Processing, Intelligent Robot, Membership, Vagueness.

### §1. 緒 言

近年、人間の代行者として、人間と直接接し、柔軟な対応が要求され、人間指向型のより高度な知的動作が求められる機械系（ロボット、計算機等）の出現が望まれるようになってきた。このような機械系の制御には、人間からの命令や人間またはその機械系自身で収集したデータが提示情報として与えられることになる。しかし、その情報にはあいまいさが含まれることが多く、従来の提示情報に正確に従った制御方法のみでは、うまく対処することが困難である。

そこで、あいまいさを積極的に取り扱う工学的手法が多く提案されるようになった<sup>(1)~(5)</sup>。最近のこの種の研究では、Zadeh によって提案されたあいまい集合 (Fuzzy Sets)<sup>(2)</sup> の考え方を応用したもの<sup>(4), (5)</sup>が中心的になっている。一方では、心理学の方面からも、人間の情報処理に関する研究が行われているが、あいまいさを機械系に取り入れた研究はあまりみられない。特に機械系をロボットに限定した場合の工学的な意味での MMI (Man Machine Interface) に関するあいまい情報処理の研究も、まだあまり行われていない。

---

\* 法政大学工学部大学院工学研究科電気工学専攻

\*\* 法政大学工学部電気工学科計測制御専攻

ここでは、ITVカメラによる画像処理能力を有する5自由度垂直多関節型ロボットアームが、自ら収集する画像情報を用いて目的の対象物位置までハンドを自動的に移動させて、その対象物をつかむという、人間指向型のあいまい制御を実現した。

本手法の基礎概念としては、確率集合論の拡張ファジィ表現<sup>(6)</sup>を利用している。従来から用いられている Membership 概念と共に、Vagueness により表現されるあいまい情報をロボット自身が画像処理により抽出して自らの動作制御に利用する。このあいまい情報は、ロボットアームのハンド先から目的の対象物位置までの位置関係を与えるおよその方向と距離を示している。また、同じく画像処理により、対象物の種類を識別し、動作制御パラメータを調節する。

このあいまい情報を求めるアルゴリズム、その情報に基づく動作アルゴリズム、そして、その運用実験結果について述べる。このようなロボット工学へのアプローチは、今後の知能ロボット研究の基礎部分の1つを形成するものと考えられる。

## §2. 画像からの情報抽出

ロボットアームが物をつかむ場合に必要となる情報は、大別して2種類ある。その1つは、つかもうとする対象物に関する情報であり、特に重要なのはその対象物の種類である。この情報で対象物が既知のものであると判明すれば、知識データベースを用いて、その大きさ、形、その他の特徴までもわかることになる。もう1つの必要な情報は、つかむ側(ロボット)のハンド先から、つかまれる側(対象物)までの位置関係である。これは、1つの3次元ベクトルとして示すことができるから、方向と距離に分けて考えることにする。これらの情報を適宜抽出できれば、ロボットアームは自らの意思で対象物をつかむことが可能になるはずである。

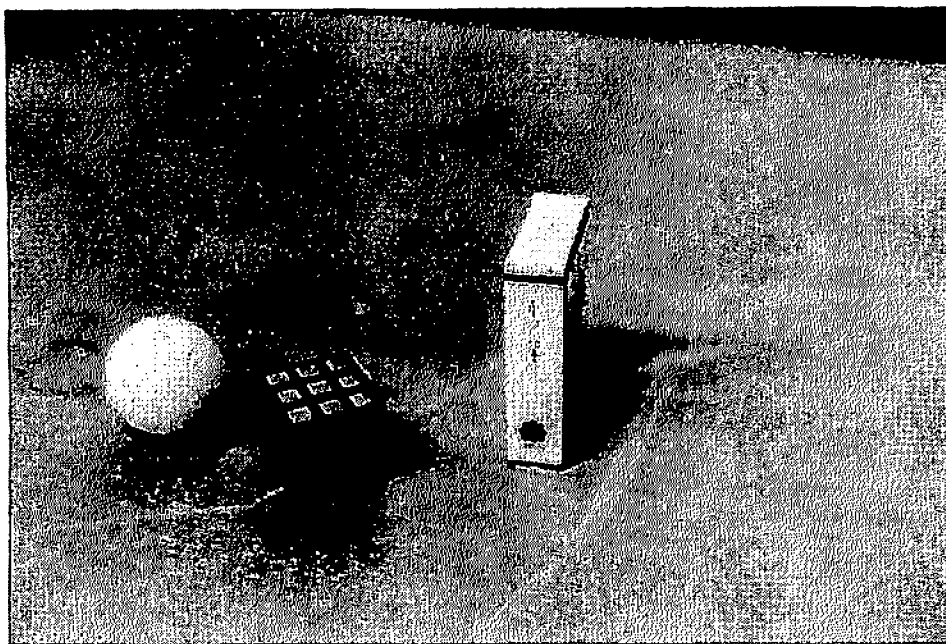


Photo 1 3 種類 の 対 象 物

この節では、これら全ての情報を画像センサーやタッチセンサー等により抽出するアルゴリズムを述べる。なお、簡単化のため、対象物は3種類 (Photo 1 参照) に限定し、画像入力は良好な状態で行われるものとした。撮影するカメラは、作業領域全体を撮影する固定カメラ (Camera I) とロボットハンドに取り付けたカメラ (Camera II) の2台を用意した。ハンドに取り付けられた Camera II は、ハンド軸とカメラ光軸が平行な場合と、30度傾くような場合の2状態を設定できるようにした (Fig. 1 参照)。これは、ハンド先が対象物に近づくと平行状態のみでは撮影不可能になるためである。

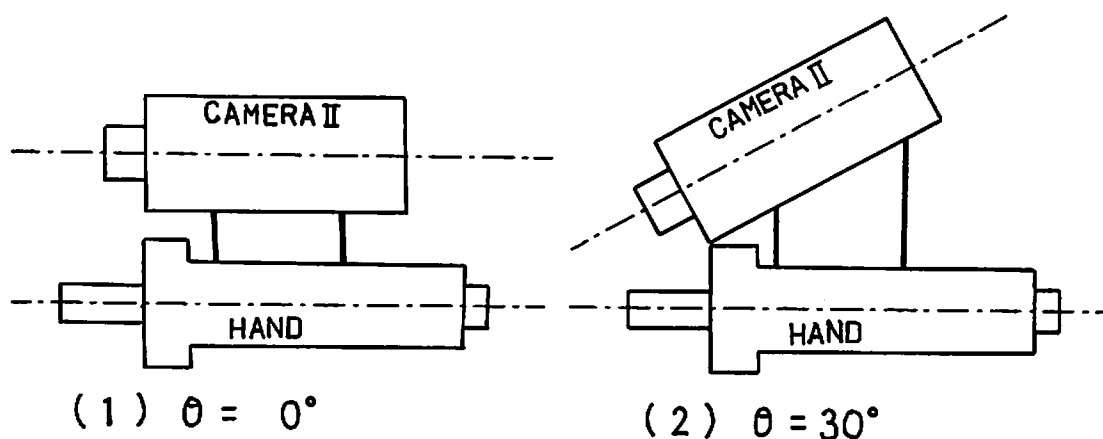


Fig. 1 Camera II とロボットハンドの位置関係

### 2.1 対象物に関する情報の抽出

ここでは、扱う対象物を ball, block, cigarette の3種に限定し、このうちのどれであるかを画像処理により識別する。

まず、対象物が写し出された白黒濃淡画像を固定しきい値2値化法により、対象物部分と背景部分に区別する。対象物部分は黒レベルで、背景は白レベルで表示する。2値化のためのしきい値はあらかじめ実験で最適と思われる値に設定しておく。

2値化によって得られた対象物部分の2次元形状からいくつかの特徴量を抽出し、それによって3種類の対象物を見分けるわけである。ここでは、アスペクト比と呼ばれる縦方向の最大長さ と横方向の最大長さの比を特徴量として採用した。ball の場合は、その比はほぼ1である。しかし、block と cigarette の場合、その見る角度によって形状がかなり変化する。写し出すカメ

対象物	アスペクト比	VAGUENESS値
ball	~ 1.1	0
block	1.1 ~ 1.4	0.5
cigarette	1.4 ~	1

Table 1 3種類の対象物のアスペクト比と Vagueness 値

ラはハンド先に固定されているので (Fig. 1 参照), やや上側から見ることになる。よって block は少し縦長に写り, 置き方によりその比は多少変化するが ball とは異なる値をとる。cigarette の場合は置く方向によってかなり変わるが, アスペクト比は, 他のものより大きい。

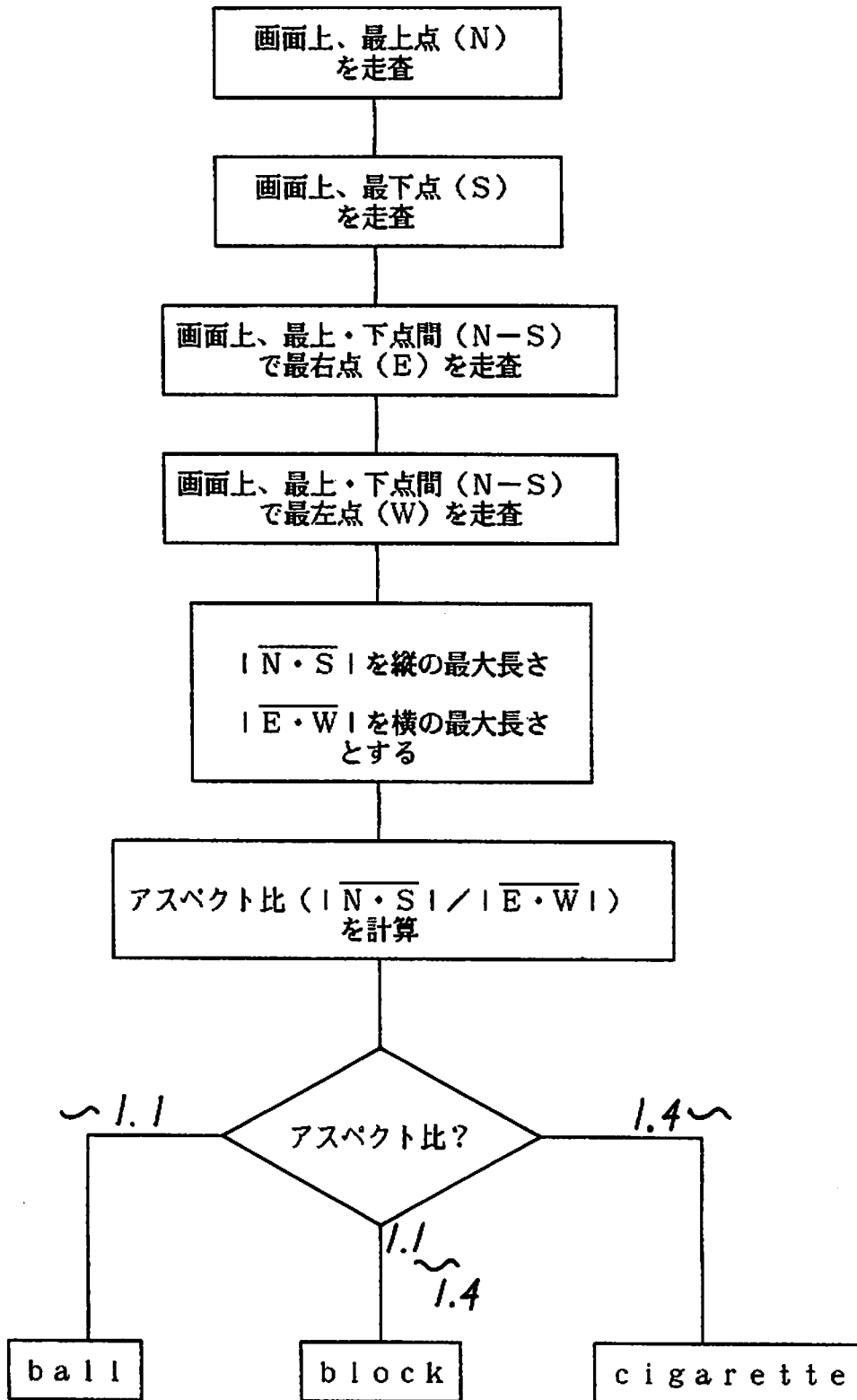


Fig. 2 3種類の対象物の識別アルゴリズム

これらの条件下で、各々のアスペクト比は実験的に Table 1 に示す範囲に収まることが判明した。その比が1.1と1.4の間に入れば block, それ以下なら ball, それ以上なら cigarette とする。

実際には、2値画像上でまず一番上の行から走査して最初の黒部分（対象物）を検出し、次に一番下の行から走査して最初の黒部分を検出し、その両者の行間差をもって、縦方向の最大長さとした。横方向の最大長さは、それらの行間範囲内で左と右から各々別方向に走査していき、初めてみつかった黒部分が存在している列の差をとることによって求めた。

ここでは、対象物を Photo 1 の3種類のみ限定したため、特徴量としてはアスペクト比のみで十分なことがわかった。しかし、対象物の個数を増やすことも検討しており、その場合はその他のいくつかの適切な特徴量が必要なものと考えられる。

このようにして、3種類の対象物を識別するアルゴリズムを Fig. 2 に示す。各対象物に関する大きさ、材料の柔軟性等の情報は簡単のため、あらかじめデータベースを作成して記録しておくことにした。

## 2.2 あいまい距離情報抽出

ロボットのハンド先から対象物までの距離情報は、ハンド先に固定された Camera II (Fig. 1 参照) による画像から求める。もし、対象物がカメラから遠ければ画面上の対象物は小さく映り、逆に近ければ大きく映し出されるはずで、2回の撮影（0と1の添字で表わす）で次に示す簡単な比例式が成立する。

$$D_0^2 : S_0 = D_1^2 : S_1 \quad (1)$$

ここで、 $D_0$ 、 $D_1$ はそれぞれの撮影時におけるカメラと対象物間の距離、 $S_0$ 、 $S_1$ はそれぞれの画面に写し出された対象物部分の面積である。2.1のアルゴリズムによって対象物はすでに識別されているので、そのデータベースに基準となる  $D_0$  及び  $S_0$  を格納しておき、写し出された画像からその面積を求めれば(1)式を変形した次の(2)式により、カメラから対象物までの距離が算出できる。

$$D_1 = D_0 \times \sqrt{S_1/S_0} \quad (2)$$

つまり、(2)式では  $D_0$ 、 $S_0$  がデータベース中に記憶されている基準位置におけるカメラー対象物間距離及び画面上での対象物面積であり、 $S_1$  は撮影した画面上の対象物部分の面積である。

実際には、まず撮影した画像を2.1と同様にして2値化し、対象物部分（黒レベル）と背景部分（白レベル）とに分割する。次に、対象物部分の画素数を数え上げて総計をその対象物の面積  $S_1$  とする。そしてこの求めた面積（総画素数）とデータベースに格納してある基本面積  $S_0$  と距離  $D_0$  を用い、(2)式によりカメラから対象物までの距離  $D_1$  を算出する。

さて、この求めた距離  $D_1$  は、それほど正確なものでないことに注意しよう。撮影時の雑音や、アナログからデジタルに変換する際のいわゆるデジタル化誤差なども当然不正確になる原因ではあるが、最も重要なのは、対象物を置く向きによる誤差である。つまり、今撮影した対象物

の2次元的形状は、データベース作成時に撮影された対象物の2次元形状の正確な相似図形には、必ずしもなっていないのである。

雑音やデジタル化による誤差は、撮影状況が良好であれば無視できるであろうが、見る方向によりその2次元的形状の面積が変化することは、この方法においては避けることができない。この問題点を解決して正確な距離値を求めようとするには、例えば見る方向によってその基本面積を修正してやること等も考えられる。しかし、そのアルゴリズムは複雑となり、実時間処理も困難になるであろう。

人間がある対象物に注目し、その距離を求める場合、いくつかの方法をとっていると考えられている<sup>(8)</sup>。例えば、2つの眼による立体情報を有効に利用するのもその1つであり、対象物が未知の場合にはかなり有効である。また注目した対象物が既知のものである場合には、経験的に覚えているその大きさとの比較から距離を求める方法も行われている。ここでは、本質的には後者の方法を適用しているわけであるが、人間は、いずれにしてもその距離を求めるのではなく距離感を把握するのである。従って距離感による情報を無理矢理数値化して距離にしても、必然的にあいまいさが混入してしまう。

上述の方法によって求めた距離にも、このあいまいさの概念が混入しているものと考えたことにした。つまり、例えば、25cmという物理量が算出されたとしても、正確に25cmという数値を表現するのではなく、‘およそ25cmくらい’という概念を求めたものと考えたことにするのである。いわゆる‘25cmくらい’という、あいまいな従来の論法では扱えないような集合を考察することになる。このような考え方は、すでに Zadeh によりあいまい集合論 (Fuzzy Set theory) として提案されている<sup>(2)</sup>。これを応用したものに、確率集合論の拡張ファジィ表現がある<sup>(6)</sup>。これは、あいまい情報を、Zadeh の Membership 概念と共に、新たに Vagueness 概念を導入して表現するものであり、拡張ファジィ表現では前者を1次モニター、後者を2次モニターと呼んで、共に  $[0, 1]$  の数値で表現する。1次モニターの Membership 情報は、算出された距離の値自体に含まれている。一方、2次モニターの Vagueness は、Membership がどのくらいの確実性を有するかを示す指標であり、すでに述べられた距離算出のアルゴリズムとは別の手法で算出しなければならない。

ここでは、簡単のため、その対象物が見える角度によっていちじるしく変化するものであれば Vagueness を1 (irrespectively) に、block のようにあまり変化しないような対象物であれば Vagueness を0.5 (roughly) に、ほとんど変化しないような対象物であれば Vagueness を0 (clearly) というように対象物に依存する  $[0, 1]$  の情報として知識データベースに付加することにした (Table 1 参照)。

求められた距離に関する全情報を整理してみよう。あいまい距離情報は、Fig. 3 に表わすような形式で表現される。ここで、横軸の距離  $x$  は “cm” 単位で示される算出距離であり、縦軸は

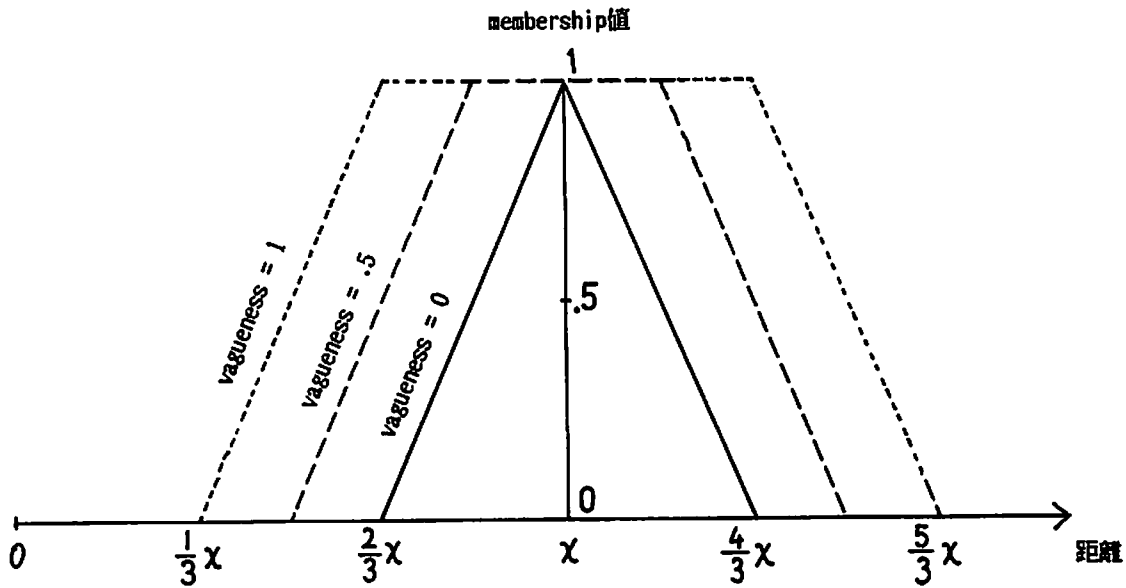


Fig. 3 あいまい距離情報（確率集合の拡張ファジィ表現）

Membership 値を表わしている。Vagueness が0の場合、 $x$  cmとして与えられた情報は、 $x$ を中心として $\frac{2}{3}x$ から $\frac{4}{3}x$ の間を台集合（support）としてもつあいまい集合と解釈され、同様に、Vagueness が1の場合は、 $\frac{1}{3}x$ から $\frac{5}{3}x$ の範囲を台集合としてもつあいまい集合と解釈される。

なお本手法で求まる距離は、カメラから対象物までの距離であり、仮にハンド軸とカメラの光軸が一致している場合にはハンドから対象物迄の距離と等価になる。しかし、実際には、カメラの光軸とハンドはずれているので誤差が生ずるが、あいまい情報の表現により吸収される程度のものであることが判明したので、特に修正は行わなかった。

このようにしてハンド先から対象物までのあいまい距離情報を算出するアルゴリズムを、フローチャートの形式でFig. 4に示した。

### 2.3 あいまい方向情報抽出

ハンドに設定された Camera II から対象物への方向は、入力画面の中央に対象物が存在していれば“前”方向に、左下に写っていれば“左下前”の方向に置かれていることがわかる。なお、求めたいのはハンドから対象物への方向であり、Fig. 1に示したようにカメラとハンドにはずれがあるので補正をすることにした。

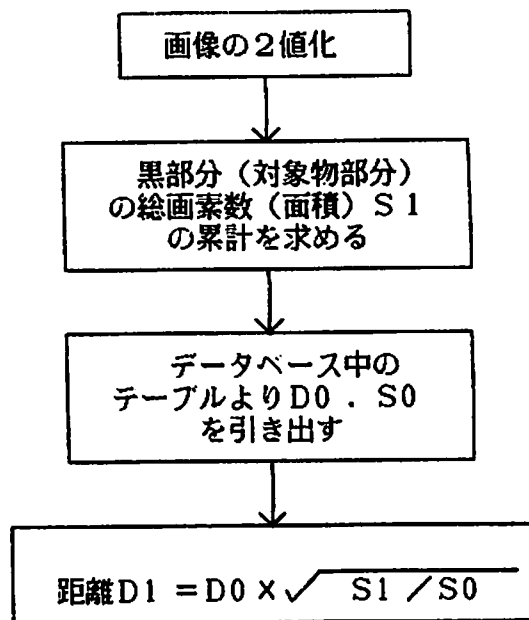


Fig. 4 ハンドから対象物までのあいまい距離



まず、ハンド軸を中心に水平方向に  $\pm 5^\circ$  以内垂直方向に  $\pm 5^\circ$  以内の方向領域を“前”，水平方向に  $5^\circ$  以上垂直方向に  $\pm 5^\circ$  以内を“右前”，同様にして水平垂直共に  $-5^\circ$  以下を“左下前”，……のようにして，各方向領域を Fig. 5 のように定めた。（この数値角度は 3.2 で述べるように，使用した I TV カメラの視野特性に依存するところが大きい。）

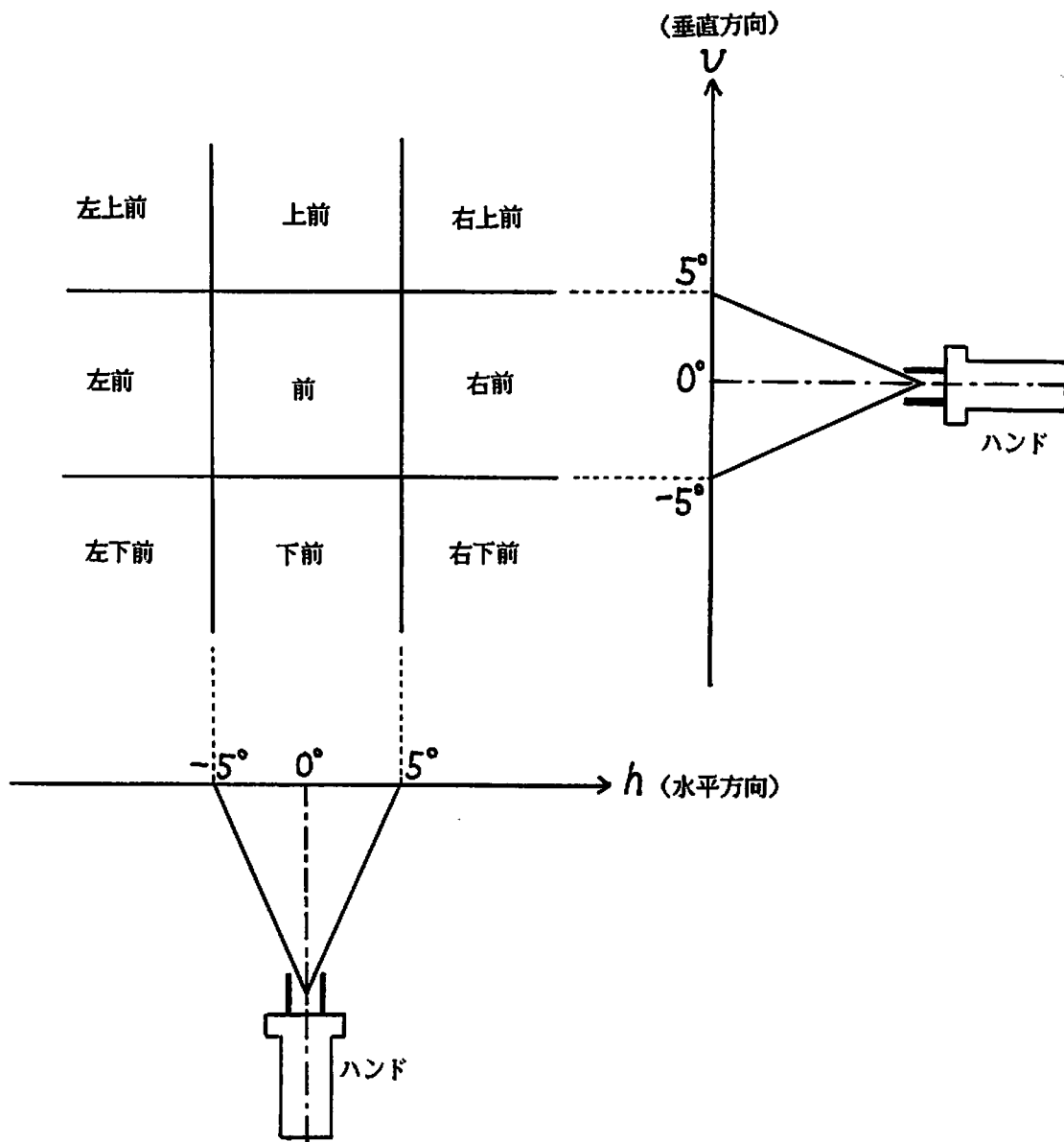


Fig. 5 各種方向に対する空間領域分割

次にハンドと対象物がある距離に設定されたときに，この方向領域が Camera II にどのように写るかを述べる。Fig. 6 のように，カメラの光軸とハンド軸は  $\theta$  だけ傾いているものとする。2.2 で述べたアルゴリズムを適用すれば距離  $\rho$  が求まる。ここで，ハンド軸上にある  $O_0$  を原点とし，紙面手前側に  $X$  軸の正方向を，垂直下方向に  $Y$  軸の正をとり，これによって形成される座標系を絶対座標系と呼ぶことにする。一方，画面上で，その中心を原点  $O_0$  とし，右に  $x$  軸の正

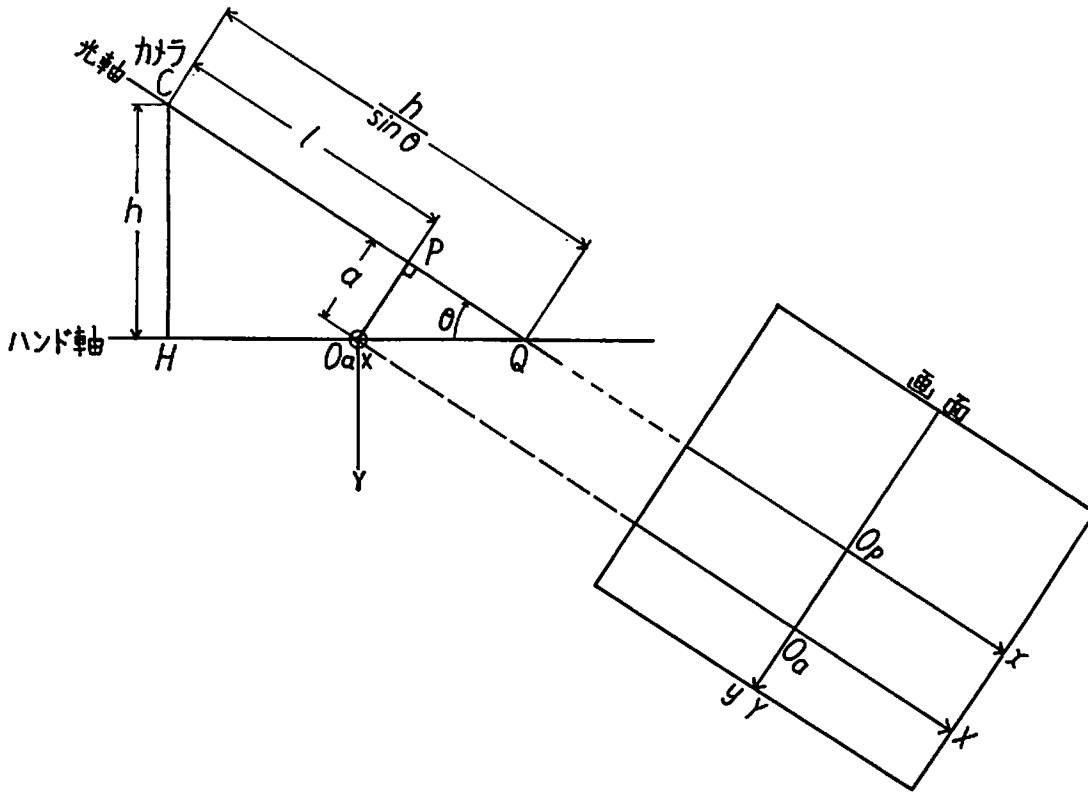


Fig. 6 カメラ軸とハンド軸のずれによる方向情報の補正

向、下に $y$ 軸の正方向をとって、画面座標系を定義する。画面上に現われる絶対座標系では、その原点 $O_a$ が $y$ 軸方向にずれを生じるだけであり、 $x$ 方向にはずれない。ここで、画面の中心 $O_p$ から $y$ 軸正方向への $O_a$ までのずれに対応する実際の距離 $a$ を求める。カメラからその光軸とハンド軸の交わる点 $Q$ までの距離 $|\overline{CQ}|$ は、カメラとハンド軸の距離を $h$ として

$$|\overline{CQ}| = \frac{h}{\sin \theta} \quad (3)$$

で表わされる。ここで三角形 $QPO_a$ に注目すれば

$$\tan \theta = \frac{a}{\frac{h}{\sin \theta} - \ell} \quad (4)$$

が成立している。この(4)式を変形して、ずれ $a$ は

$$a = \frac{h}{\cos \theta} - \ell \tan \theta \quad (5)$$

として求まる。実際には $\theta$ は $0^\circ$ か $30^\circ$ であり、 $\theta$ が $0^\circ$ の時、(5)式は

$$a = \lim_{\theta \rightarrow 0} \left( \frac{h}{\cos \theta} - \ell \tan \theta \right) = h \quad (6)$$

となる。また、 $\ell = |\overline{CQ}|$ の場合は、 $a = 0$ でずれはなくなり、 $\ell > |\overline{CQ}|$ の場合、 $a$ は負となり、画面の $y$ 軸負方向（上方向）にずれが生じることもわかる。

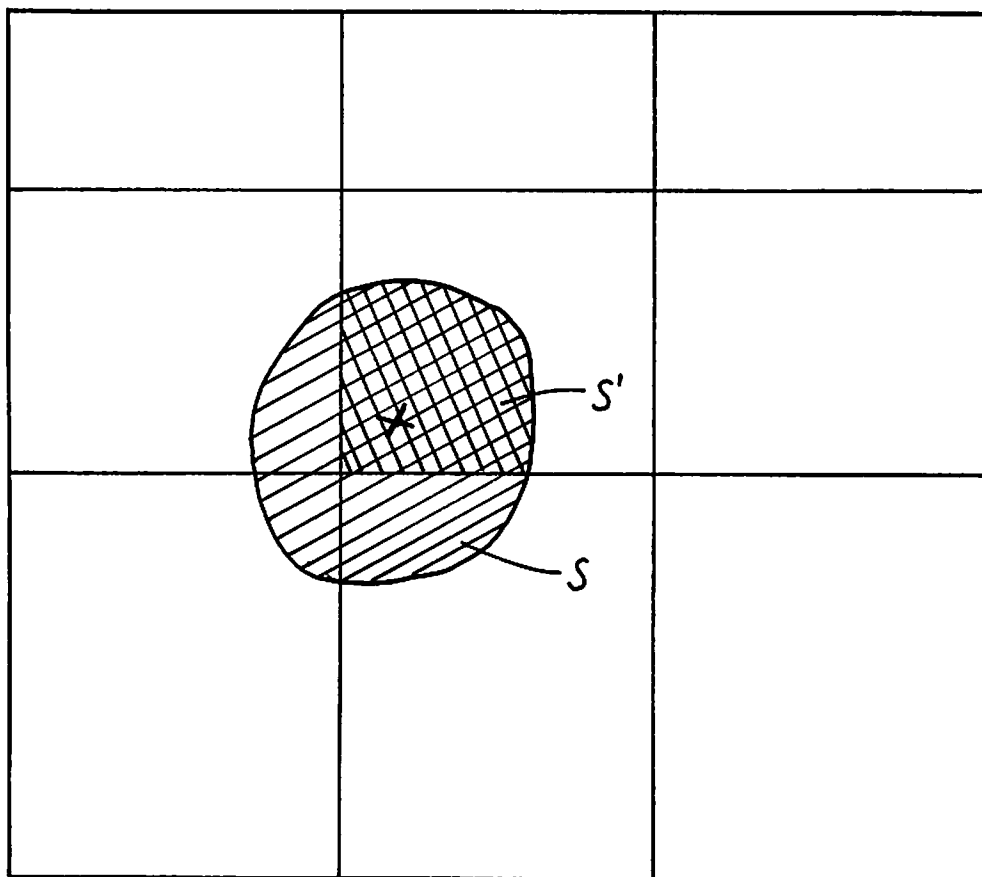
さて、カメラから対象物の距離が決まれば、画面上での各方向に対する領域の分割ができるので、画面に写る対象物が、ハンドに対して“前”、“左下前”、……のうちでどの方向にあるかが

わかることになる。

ここで、“前”等の言語変数とし表わされる方向には、人間が日常会話で使うのと同様なあいまいさが含まれている。2.2でも述べたように、求められた方向は概念として求められたものと解釈し、確率集合論の拡張ファジィ表現で表わすことにする。

これまでは対象物を点として扱ってきたが、実際には有限の大きさを持つ。これまでの議論における点は対象物の代表点を意味するものとみなし、実際には画面における重心をその代表点として採用した。その代表点が画面上で区別された9つまたはそれ以外の方向領域のどれに属するかで方向が決定されることになる。しかし、写し出された対象物の全ての部分が1つの方向領域

画面



対象物全面積：S  
重心の方向領域内の面積：S'

- 0.0 ≤ (S' / S) < 0.4 -----> VAGUENESS = 1
- 0.4 ≤ (S' / S) ≤ 0.7 -----> VAGUENESS = 0.5
- 0.7 < (S' / S) ≤ 1.0 -----> VAGUENESS = 0

Fig.7 対象物の映り方による Vagueness 値の決定

に収まっているとは限らない。もし、対象物全体がすっぽりと1つの方向領域に収まっているならば、確実にその方向であるといえよう。それに反し、重心の存在領域以外の部分にも対象物がはみだしていれば、重心の存在方向に間違いはなくとも、何等かの考慮をする必要が生ずる。この情報を拡張ファジィ表現における2次モニター Vagueness によって表現することにした。つまり、決定された方向領域内に、対象物の全面積のうちどのくらいの部分が収まっているかによって Vagueness の値を決定するのである (Fig.7 参照)。実際には、対象物部分の総面積の100%~70%が重心と同一の領域内にあるならば、Vagueness=0, 70%~40%ならば Vagueness=0.5, 40%以下ならば Vagueness=1と設定した。

求められた方向に関するあいまい情報について整理してみよう。求めるあいまい方向情報は Fig.8 に示すようなものである。例えば、“前”と示された情報は、Vagueness が0のときハンド軸の方向(0°)を中心に、水平、垂直方向ともに±5°の間に台集合を持つ一つのファジィ集合と解釈する。同様に Vagueness が1, したがって1次モニターであるその方向情報“前”が本当に確実とは言えない場合、±10°の範囲を台集合とするファジィ集合と解釈することになる。

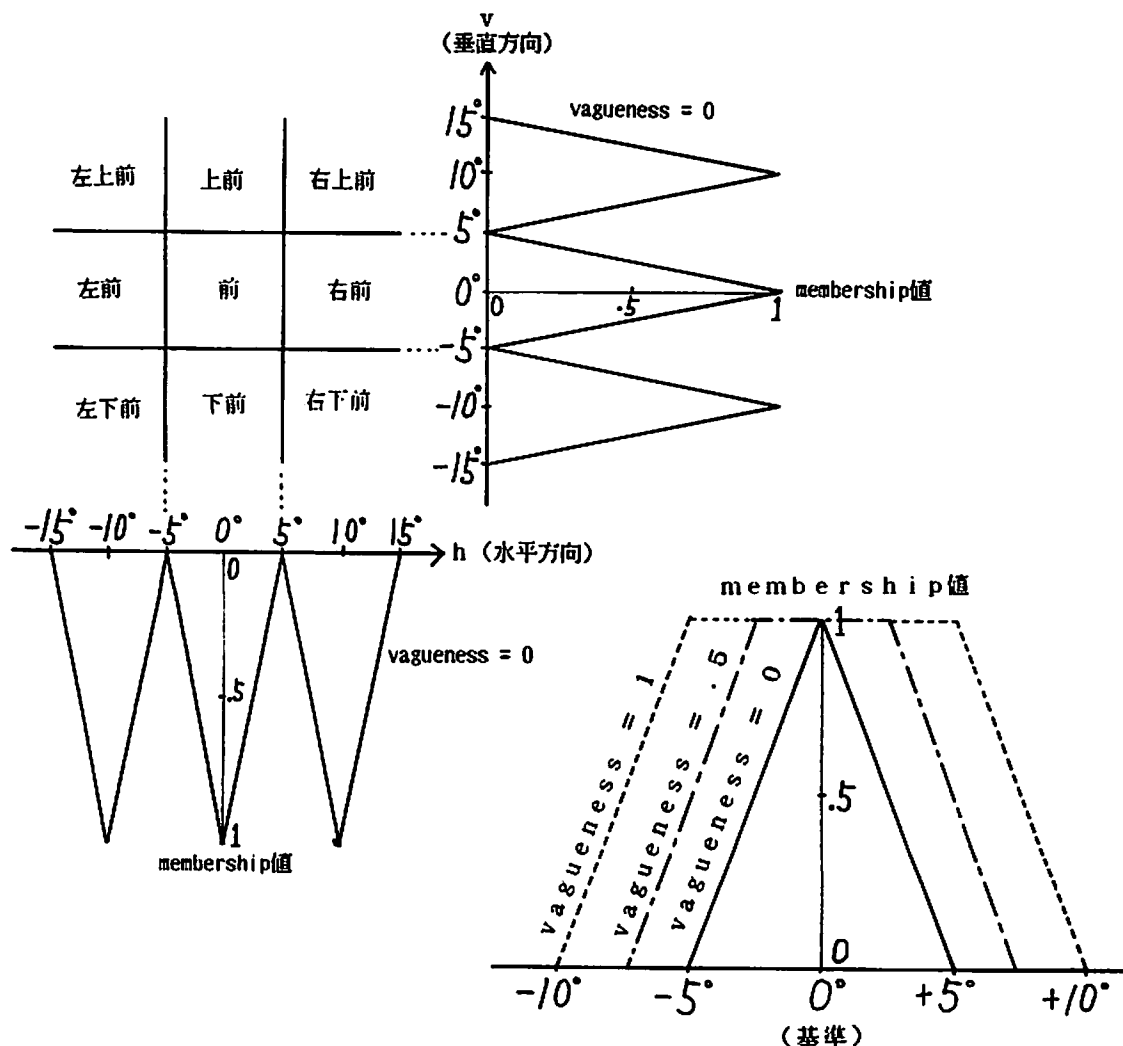


Fig. 8 あいまい方向情報 (確率集合の拡張ファジィ表現)

以上の方法であいまい方向情報を求めるアルゴリズムのフローチャートをFig. 9に示した。

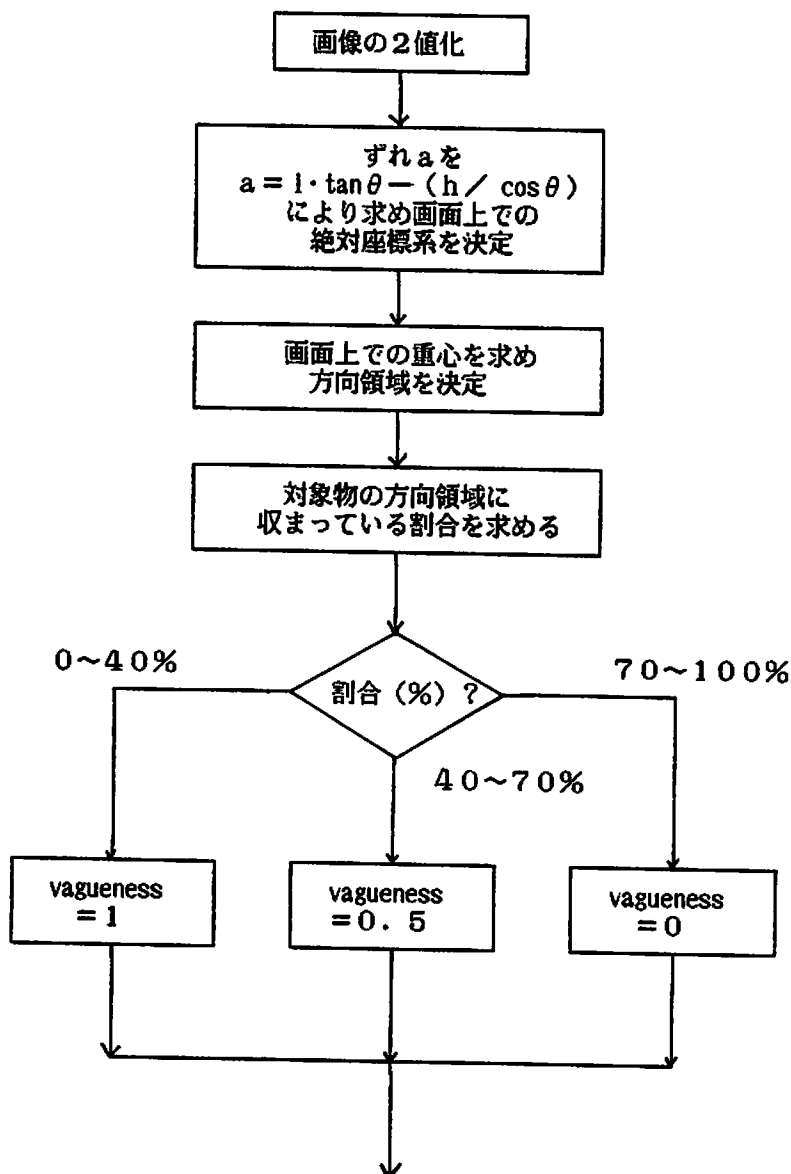


Fig. 9 ハンド先から対象物までのあいまい方向算出アルゴリズム

### §3. ロボット制御方法

本節では、§2で述べた対象物・距離・方向に関する情報をいかにして、ロボットの制御に適用するかを述べる。2.2, 2.3で求まるあいまい情報は、それぞれ確定した個別の値としてではなく、あいまい集合として抽出されることになる。しかし、実際ロボットが動作する際には、ただ1つの確定したパラメータ値を選び出す必要がある。まず、あいまいな情報である距離、方向から確定したパラメータをいかに設定し、これらの情報をどのようにロボット制御に適用したかを述べる。そして、構築した実際の全システムの概要を述べる。

#### 3.1 あいまい距離情報の適用

あいまい距離情報は、2.2で述べたアルゴリズムにより Fig. 3 のような形で与えられた。これから、ある1つの値を選び出す方法はいくつか考えられるが、ここでは、Membership の形による重み付けをして、ランダムに選出する方法を採用した。従って、例えば、Membership の値が1に近いほど、選ばれる可能性が大きくなることになる。

ここではさらに実動作上の安全性についても考慮することにした。今、Fig. 3 のような距離  $x$  cm を中心とする台集合を持つあいまい集合の中から、Membership 値による重み付けをしてランダムに選出した値を  $y$  cm とする。この時の真の距離と比べて  $y$  の方が大きい場合も十分に考えられるので、その場合はそのまま  $y$  に従ってロボットのハンドを動作させると、対象物をたおしたりつぶしたりしてしまう可能性もある。このような事態を極力避けるために、Fig. 3 を若干変更することにした。まず、求めた距離  $x$  を0.8倍し、それを  $x_0$  とする。 $x$  より大きな値を取ることはかなりの危険性があるので、台集合の上限が  $x$  より大きくなるように Fig. 10 のよ

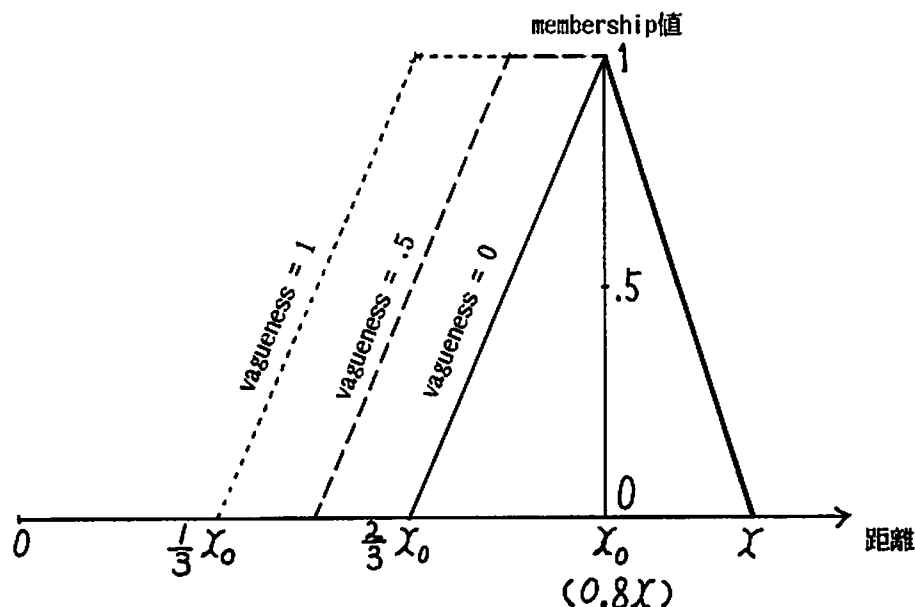


Fig.10 実際に適用したあいまい距離情報

うに修正した。つまり、Fig. 3 の  $x$  を  $x_0$  にし、その左側（距離の短い方）は同じであるが、右側（距離の長い方）は、Vagueness によらず常に  $x_0$  における値1から  $x$  における値0への直線で与えることにした。ロボット制御用プログラムでは、画像処理により求めた  $x$  cm と Vagueness の値（0か0.5か1）から、Fig. 10 のような Membership+Vagueness の形を作り出し、重み付けによりランダムにある1つの値を選出し、その値をロボットのハンド先が実際に動く際の動作パラメータとして用いることにする。

### 3.2 あいまい方向情報の適用

あいまい方向情報は2.3で述べたように、Fig. 8 のような形で与えられた。ここでも、ロボットを実動させる際には、垂直方向に示されたあいまい集合の中からそれぞれある1つの値を選択

しなければならない。この選択法としては、3.1の距離の場合と同様に、Membership+Vaguenessの形に重み付けをしてランダムに選出する方法を採用した。

さらに、ここでも、安全性を考慮にいれ、以下に述べる多少の変更を行う。決定した方向が“前”以外でしかも Vagueness が1のとき、水平・垂直方向共に 選ばれる可能性がある最大と最小の角度は、それぞれ $\pm 20^\circ$ である。仮に、中心より外に向かってこの最大又は最小の角度が選ばれたとすると、これに従って動いた後に対象物がカメラの視野範囲外に出てしまう危険性が生ずる。そこで、Fig. 8において基本の方向領域よりはみだしている $+15^\circ$ 以上、 $-15^\circ$ 以下を破棄し、Fig. 11のように修正した。

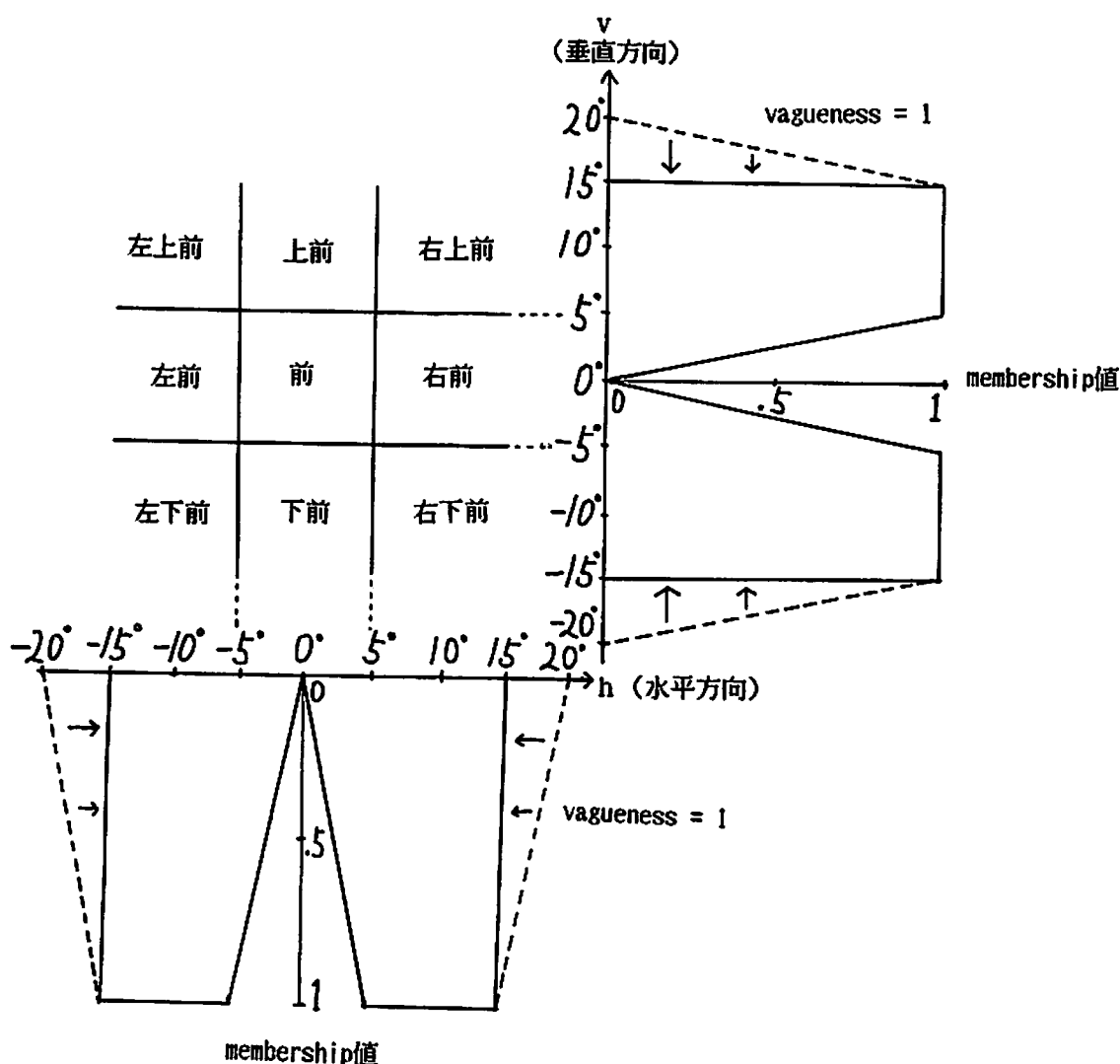


Fig. 11 実際に適用したあいまい方向情報

2.3でも少し述べたが、“前”を $(0^\circ, 0^\circ)$ としたとき、“右上前”を $(10^\circ, 10^\circ)$ 等に定めたのは、ここで用いたITVカメラの視野特性にも大きく影響をうけていた。このカメラの視野特性はFig. 12に示すように、水平方向に約 $30^\circ$ 、垂直方向に約 $24^\circ$ である。ここで用いた9種類の方

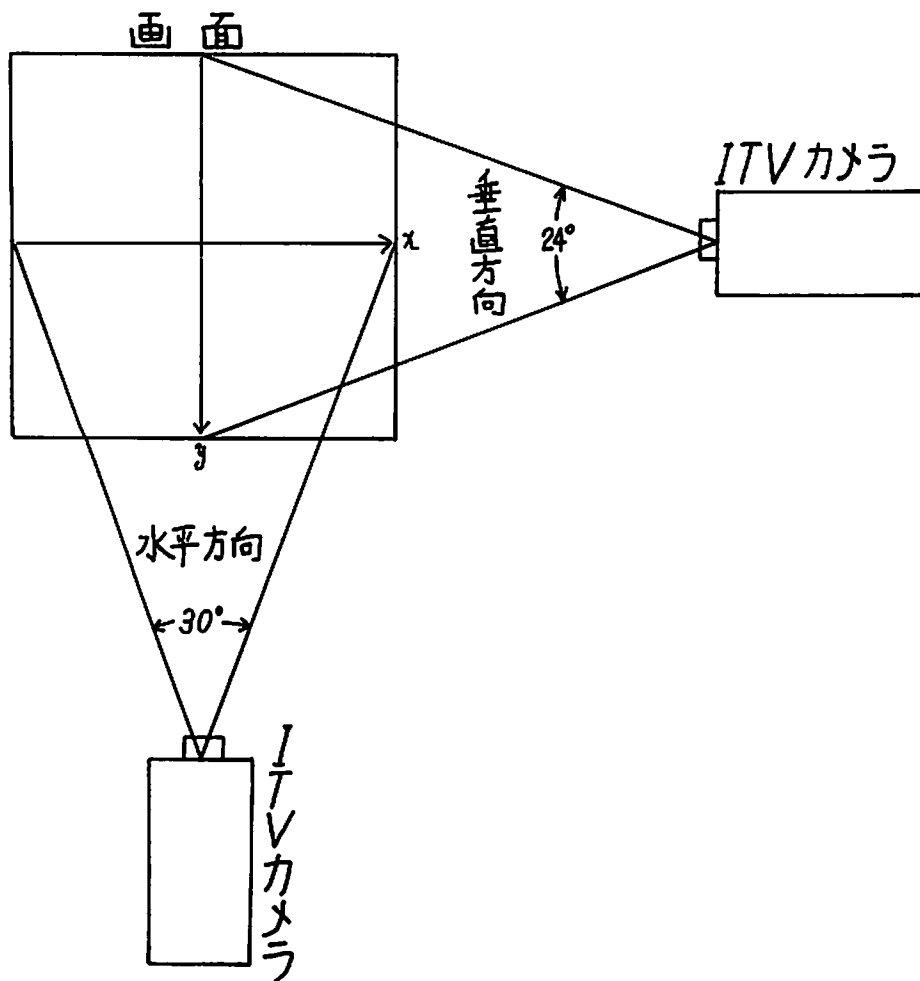


Fig.12 ITVカメラの視野特性

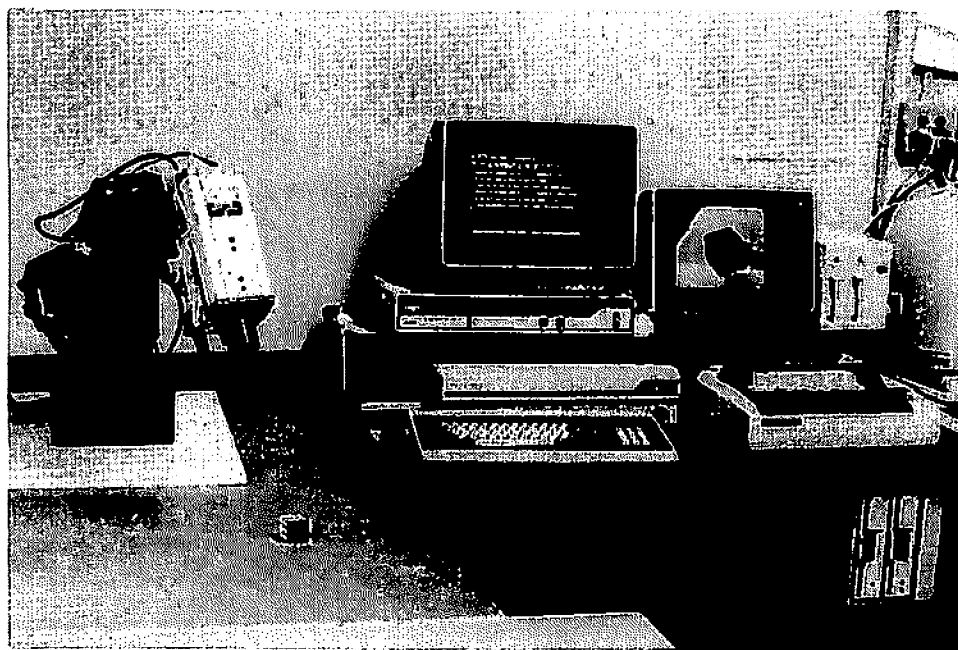


Photo 2 あいまい情報を用いたロボット制御システム



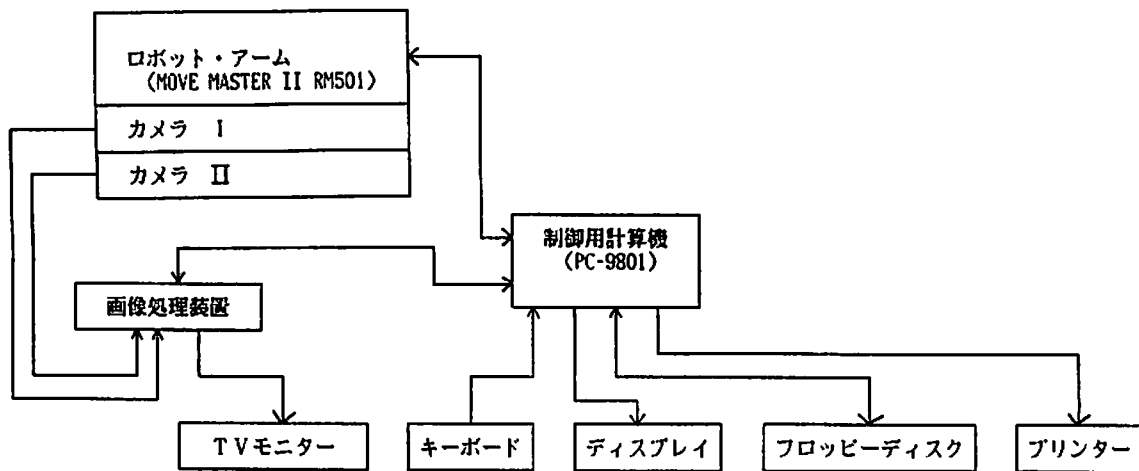


Fig.13 あいまい情報を用いたロボット制御システム構成

向領域の言語表現は、実際の人間のものとは、およそ一致している程度である。ここでは、画面上を縦横におよそ3分割して作られる9つの各方向領域を人間のそれにあわせて、“前”や“右上前”等と名付けることにした。

### 3.3 ロボット制御システム

画像処理により得られる対象物情報、あいまい距離情報、あいまい方向情報を利用して、ロボットのハンドを対象物に接近させそれをつかむというロボット制御システムを構築した。このシステム全体の構成を Photo 2, Fig.13 に、アルゴリズムを Fig.14 に示す。システムの構成は、5自由度の垂直多関節型ロボットアーム三菱製 RM501 (ムーブマスターⅡ) (Fig.15 参照) 1台、1 TVカメラ及び256×240画素で、各画素が64階調(6 bits)の濃淡で表示可能な画像処理装置 edec (社)製 ED-1161 (IMAGE PC) 及びカメラの画像を表示する画像モニター、そしてロボット及び画像装置に接続されロボットの制御及び各種処理を行う NEC製 PC-9800 シリーズマイクロコンピュータシステム(キーボード、モニター、ディスク装置を装備)から成る。

1 TVカメラⅠは作業場全域を映し出すように作業台に固定されているが、Ⅱはロボットのハンド先に固定されてロボットと共に動く。Fig.14のフローチャートには表わされていないが、1 TVカメラⅡは、Fig.1に示したように、2つの設置形態を持つ、つまりカメラが、ハンドと平行に固定されている場合 (Fig.1-(1)) と、30°傾いて固定されている場合 (Fig.1-(2)) の2通りである。これは、平行な場合のみでは、ハンドと対象物が接近した際、カメラの視野範囲内に対象物が入らなくなってしまうからである。よって、ある程度近づいたら、カメラをFig.1-(2)のように傾ける。

Fig.14の本システム全体のフローチャートについてもう少し詳しく述べる。最初のロボットの姿勢を Photo 3に示す。まず、カメラⅡで撮影するわけであるが、その視野範囲内に対象物が入っているとは限らない。カメラⅡに対象物が写らない場合、カメラⅠにより対象物をとら

え、およその位置を求めたうえで、ロボットの waist 関節部及び wrist pitch 関節部のみを動作させ、対象物がカメラ II の視野範囲内にくるようにする。カメラ I は作業台に固定されているので、対象物が画面に映る位置により、一意的にその座標が決定される。ここでは、その画像から正確な対象物の座標を求めてつかむという制御は目的としていないので、画面を16×15に分割し、あらかじめ各々のブロックに対応する座標を算出してテーブルに記憶しておき、対象物が存在するブロックを求めてから座標値を引き出す。

このようにして、対象物がカメラ II の視野範囲に入ったら、その濃淡画像の2値化を行い画面内における対象物の重心を求める。2値化には固定しきい値を用い、モニターに結果を表示する。この際対象物部分とみられる黒レベルの総画素数をも同時にカウントする。そして重心を求めるには、理論的には各1画素を単位として計算しなければならないが、実行速度を向上させるため、16×16画素の小ブロックを基本単位として考えた。つまり、全画面を16×15の小ブロック(16×16画素)に分割し、各々の小ブロック内で16画素のみを取り出して (Fig.16参照)、黒レベル(階調は0で対象物を示す)が10画素以上あれば、その小ブロックに対象物の一部が写っているものと判断した。これらのブロック単位で重心を算出する。従って、ある画素が重心とし

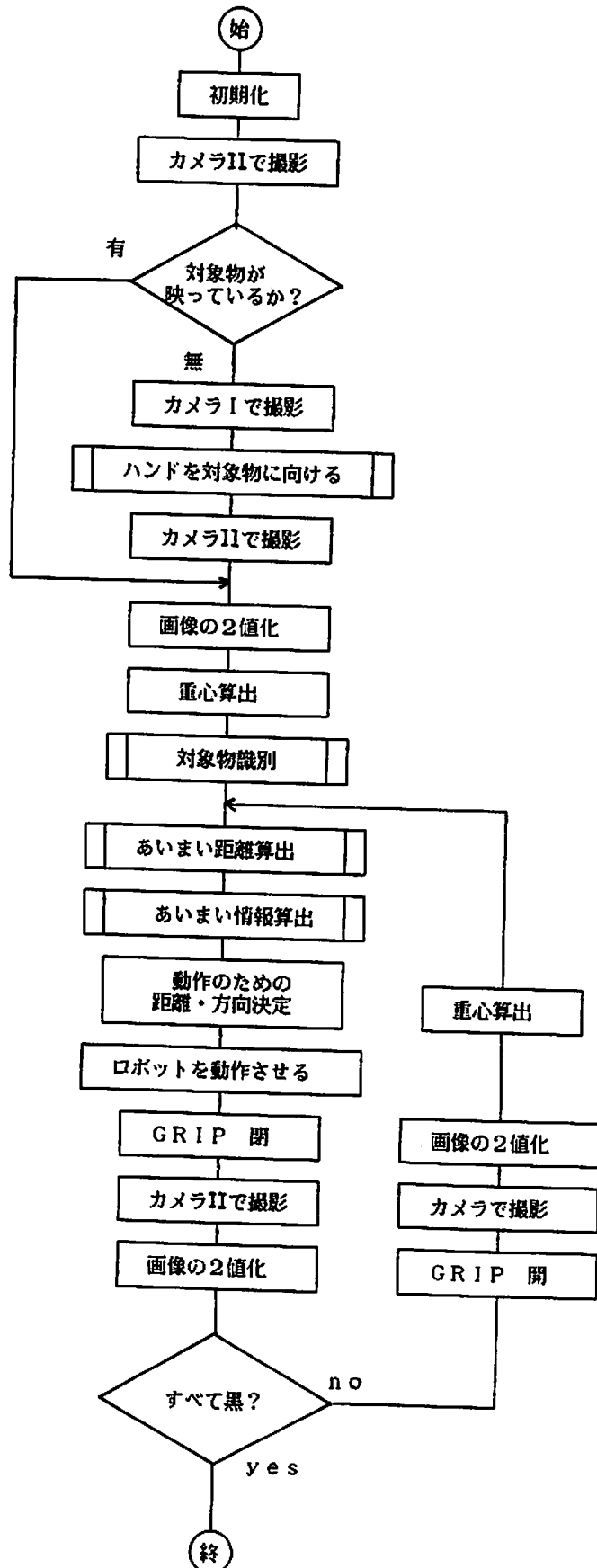


Fig.14 あいまい情報を用いたロボット制御システムの制御アルゴリズム

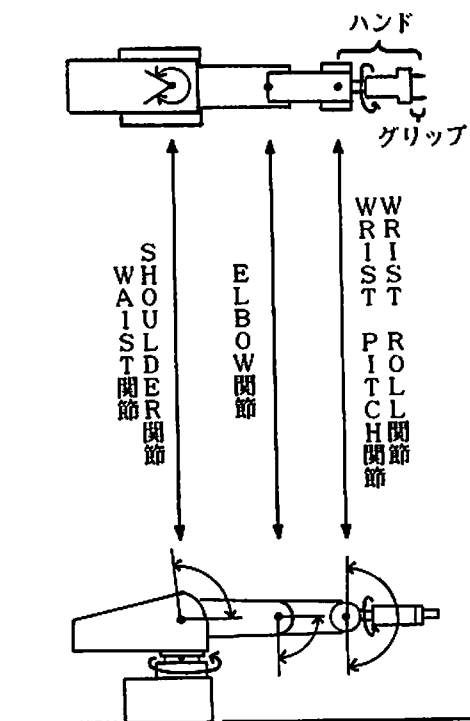


Fig.15 三菱RM501垂直多関節型ロボットアーム

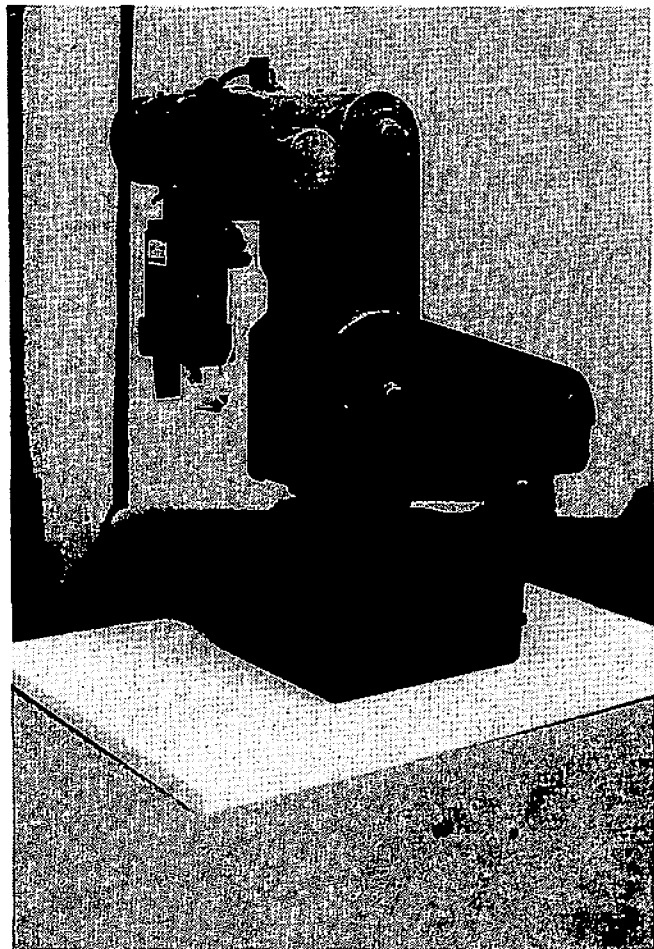


Photo 3 ロボットアームのホームポジション

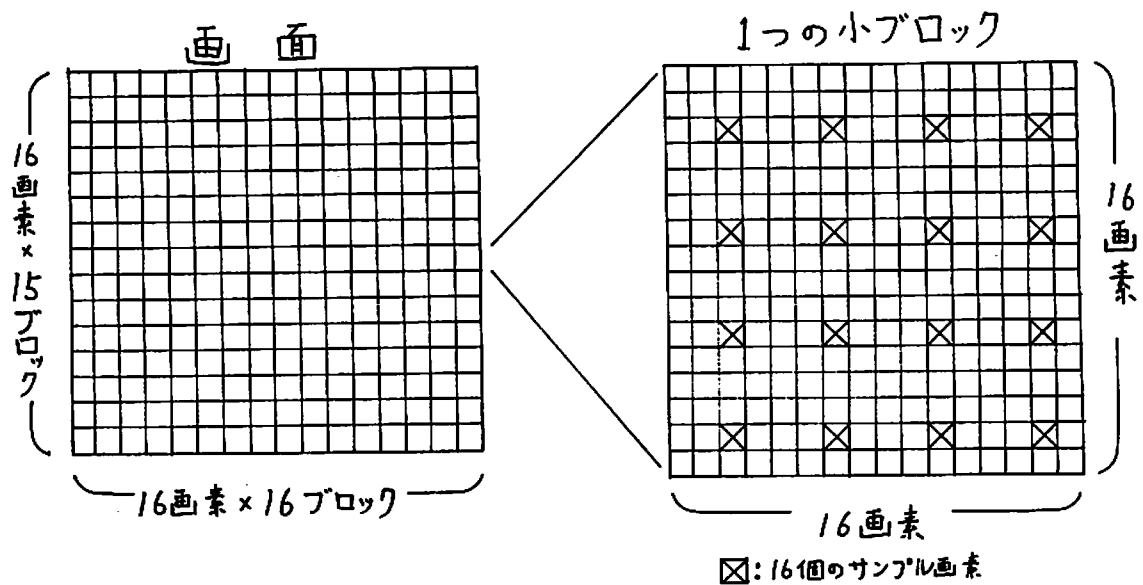


Fig.16 小ブロックの構成

て求まるのではなく、 $16 \times 15$ の小ブロックのどれかに決定されるわけである。2値化画像の形状(アスペクト比)は対象物の識別に、2値化画像の黒レベル画素(対象物集合)総数は距離の算

出に、重心は方向を算出するのに利用される。これら各々のアルゴリズムは、すでに§2で述べている。また、あいまいな距離と方向の情報から、1つの値を決定する方法は、本節の1及び2で述べた。ロボットのハンドからの距離と水平・垂直方向は、1つの3次元ベクトルを構成するので、このベクトルを用いてハンドを移動させる。

次に、ロボットのグリップを閉じ、対象物をつかむ。しかし、十分に対象物に接近していなければつかめずに、グリップはただ閉じられるだけである。ここでは、グリップにタッチセンサとして簡単なマイクロスイッチを取りつけてあり、対象物が実際につかまされると、スイッチが切れるようにしてある。このスイッチはITVカメラに接続されており、スイッチの切れた状態で撮影するとその画面は真黒になる。これによって、つかんだか否かを判別するのである。まだつかめなかったならば、グリップを開いて撮影しなおし、再度必要な情報を求めるようにする。このようにして、つかむまでこのアプローチを繰り返す。

実際のプログラムは、16 bit の micro-computer PC-9801上のN88-DISK BASIC とアセンブラ言語で作成した。アセンブラ言語は、2値化や重心を求める画像処理のルーチンで使用して高速化をはかっている。

#### §4. ロボット制御の実験結果

§2, §3で述べた方法に基づいてプログラムを作成し、実際にある対象物を作業場の任意の場所に置き、ロボットが自動的にそれをつかむ実験を行った。

このプログラムを走らせると、ロボットは自ら初期化を行って前準備をする。Photo 3にロボットの初期位置を示す。これを“ホーム・ポジション”と呼ぶ。ロボットのハンドに固定したITVカメラⅡで、対象物が写し出されなかった場合は、作業場を写し出すカメラⅠの助けをかりて、カメラⅡの視野範囲に対象物が収まるように、ロボットはハンドの向きを調整する。あとは、カメラⅡを用いた画像処理により対象物を識別し、あいまいな距離及び方向情報を求める。これらのあいまい情報は、一意的な値としてでなくある範囲にわたって指定されるので、Membership+Vaguenessの形による重み付けをして台集合の中からランダムに1つの値を選び出す。安全性が考慮され、決定された距離は、少し短めの可能性が強いので、1回では目的（対象物）位置に到達しないかもしれない。そこで、何回かのアプローチにより、対象物をつかむことになる。いったんシステムが動き出してしまえば、人間は何の情報も与える必要がなく、ロボットが自ら必要な情報を収集しながら適切な動作をすることになる。

実際の動作例を1つ取り上げてみよう。対象物には“block”を用い、ホームポジションにおいてカメラⅡの視野外となる場所に置いた。ここで用いた座標系は、ロボット・アームの中心軸と作業台との交点を原点とし、ロボットの正面をx軸正、それに対し左側をy軸正、上に向かってz軸正とし、単位をcmで表現した。

STEP 0	ホームポジションに移動 ハンド座標 = (16.0, 0.0, 28.3) cm ハンド角度 = (0°, 90°)
STEP 1	ハンドを対象物に向ける ハンド座標 = (24.8, 30.8, 30.3) cm ハンド角度 = (7°, 65.2°)
STEP 2	対象物="BLOCK" (アスペクト比=1.18) あいまい距離 $x=28$ cm ( $x_0=22.4$ cm) $vagueness=0.5$ あいまい方向 "左上前" (( $h, v$ ) = (-10°, 10°)) $vagueness=0.5$ (存在割合=57%) 移動距離 $\xrightarrow{\hspace{2cm}}$ 25.3 cm 移動方向 $\xrightarrow{\hspace{2cm}}$ (-3.5°, 8.1°) ↓ ↓ ハンド座標 = (38.3, 5.6, 9.1) cm ハンド角度 = (8.3°, 65.2°)
STEP 3	あいまい距離 $x=17$ cm ( $x_0=13.6$ cm) $vagueness=0.5$ あいまい方向 "上前" (( $h, v$ ) = (0°, 10°)) $vagueness=1$ (存在割合=36%) 移動距離 $\xrightarrow{\hspace{2cm}}$ 7.5 cm 移動方向 $\xrightarrow{\hspace{2cm}}$ (1.8°, 10.9°) ↓ ↓ ハンド座標 = (42.7, 6.1, 3.0) cm ハンド角度 = (8.1°, 65.2°)

Table 2 あいまい情報を用いたロボット制御実験結果例

対象物 "block" の置かれた実際の座標は ( $x, y, z$ ) = (45, 5, 0) cmであった。これをカメラⅠがとらえ、ロボットは、アームの WAIST 関節と WRIST PITCH 関節のみを適当に動かした。これは、Table 2における Step 1 であり、それぞれの動いた角度は 7° と 65.2° である。するとカメラⅡにより対象物が写し出されるので、対象物が "block" であることが判別される。この時のアスペクト比は1.18であった。次に Step 2 では、対象物までの距離及び方向を算出し、それぞれ28cm, "左上前" つまり ( $h, v$ ) = (-10°, 10°) ( $h$ は水平方向,  $v$ は垂直方向) が求まった。ここで、距離の Vagueness は対象物が "block" なので0.5, 方向の Vagueness は0.5と求まる。これらのあいまい情報から実際に移動させるための情報を重み付けによってランダムに決定した結果は、距離25.3cm, 方向は (-3.5°, 8.1°) である。このようにして、総計3つの段階でハンドは対象物をつかむことができた (Photo 4 参照)。なお、カメラ撮影から



Photo 4 あいまい情報を用いたロボット制御実験例

実動作までに必要な計算時間は、およそ数秒程度である。

## §5. 結 言

ロボットから必要な全情報を画像処理により求め、Membership と共に Vagueness 概念を用いてあいまい情報によりロボットを制御する新しいアルゴリズムを紹介した。全システムは、工業用ロボットアーム制御用16 bits マイクロコンピュータ・画像処理装置で構成されている。ここでの目的は最適制御ではなく、柔軟な人間指向型のあいまい情報を適用した制御である。

あいまい情報を求めるアルゴリズムは非常に単純であり、更に動作アルゴリズムも簡単なものになった。ここでは、一般的に時間がかかると言われる画像処理を用いたが、制御に必要な情報があいまいなもので十分なことに起因するアルゴリズムの単純化により、かなりの高速化がはかられた。また、動作アルゴリズムは、何回かのアプローチが必要ではあるが、各々は単純であり人間が理解しやすい形式をとっている。

Vagueness を加味した Membership の値は、ここでは経験的及び実験的にあらかじめ設定しておいたが、これらを学習させ最適になるよう調節することにより、より人間指向型の制御が実現されるはずである。ここでは、ロボット自身が、画像センサを利用して必要な情報を求めているが、この情報が人間から与えられた場合でも、動作アルゴリズムは正しく実行される。この時、距離は数値だけでなく、言語変数（例えば‘もう少し’等）と与えてもうまく機能する。それについてはすでに参考文献7で述べた。

ともかく、あいまい制御アルゴリズムの基礎的な部分の具現に成功し、有益性を示すことがで

きた。このようなロボット工学へのアプローチ法は、今後、知能ロボット研究を進めていくうえでの1つの指針を与えるものと思われる。

#### 参 考 文 献

- (1) Duda, Hart & Nilsson: "Subjective Bayesian methods for rule-based inference systems", Nat. Computer Conf (1976).
- (2) L. A. Zadeh: "Fuzzy Sets", Inf and Control 8 (1965), pp. 338/353.
- (3) E. H. Schortliffe: "Computer-Based Medical Consultations MYCIN", American Elsevier (1976).
- (4) Mamdani & Assilian: "A Case Study on the Application of Fuzzy Set Theory to Automatic Control", Proc IFAC Symp. on Stochastic Control (1974).
- (5) E. Sanchez: "Solution of Fuzzy Equations with Extended Operations", Fuzzy Sets and Systems 12 (1984), pp. 237/248.
- (6) K. Hirota: "Extended Fuzzy Expression of Probabilistic Sets", Advances in Fuzzy Set Theory and Applications, North Holland (1979), pp. 201/214.
- (7) Hirota, Arai & Pedrycz: "Robot Control Based on Membership and Vagueness", Approximate Reasoning in Expert Systems, North Holland (to appear in 1985 April).
- (8) Lindsay, Norman: "Human Information Processing An Introduction to Psychology", Academic Press, (1977).
- (9) Braae and Rutherford: "Fuzzy Relations in a Control Setting", Kybernets, 7 (1978), pp. 185/188.